

アイソスタシーを理解するための仮想地球アプリケーションの開発

著者	澤口 隆
著者別名	Takashi SAWAGUCHI
雑誌名	東洋大学紀要 自然科学篇
巻	63
ページ	15-27
発行年	2019-03
URL	http://id.nii.ac.jp/1060/00010467/

アイソスタシーを理解するための仮想地球 アプリケーションの開発

澤口 隆*

A Development of Virtual Earth Web-Application for Better Understanding of Isostasy

Takashi SAWAGUCHI*

Abstract

Isostasy is a key concept to explain topographic height differences at Earth's surface with gravitational equilibrium between Earth's crust and mantle. A new interactive web application named "Isostasy_Globe" is developed and released, that visualizes both topographic/bathymetric world maps and crustal thickness on the virtual Earth model. Learners can obtain height/depth and crustal thickness data at a specific point on the globe. Some pedagogic idea for better understanding of a concept of Isostasy using the web-application are shown in this paper.

Keywords : Isostasy, Geoscience education, Web application

1. はじめに

地球上の最高峰は、標高8848mのエベレスト山（中国名チョモランマ、ネパール名サガルマータ）である。高い山の圧力を支えるには、その下に厚い地殻が存在するか、高い山自身が密度の軽い物質で構成されていると考える、いわゆる“アイソスタシー”の概念は、古く19世紀には議論されていた。エベレスト山を含むヒマラヤ山脈では、その山体の引力の影響によって重力の方向が曲げられ、鉛直線偏差（重力の方向と地球楕円体に立てた垂線との角度）が大きくなることが予想されるのに対して、19世紀中頃に行われたイギリス測量隊の観測では、計算から求められる値よりも小さいものであった。そこでこれを説明

*) 東洋大学自然科学研究室 〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20

Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

するために、イギリスのプラット (J. H. Pratt, 1809-1871) やエアリー (G. B. Airy, 1801-1892) は、地下に分布する物質の密度やその深さなどに原因を求め、こうした地形と地球内部の密度との均衡現象をアメリカのダットン (C. E. Dutton, 1841-1912) がアイソスタシーと名付けた。

アイソスタシーの概念は、高等学校理科「地学基礎」には含まれておらず、上位科目である「地学」で取り扱うことになっている。しかし、高校生の「地学」の履修率は1%程度と推定されており (川辺, 2017)、ほとんどの生徒がアイソスタシーの概念を学んでいないことになる。アイソスタシーは、山脈の形成、最終氷期以降の回復運動、海底の深さ、縄文海進とその後の海水準低下など、地球表層の様々な現象の理解には欠かせない概念である。本論では、アイソスタシーの理解を助けるために開発した仮想地球アプリケーションとその教育活用方法を報告する。

2. アイソスタシー

2.1. アイソスタシーの概念

アイソスタシーの初期の考え方には、エアリー説 (エアリー・モデル) とプラット説 (プラット・モデル) があった (Fig. 1)。

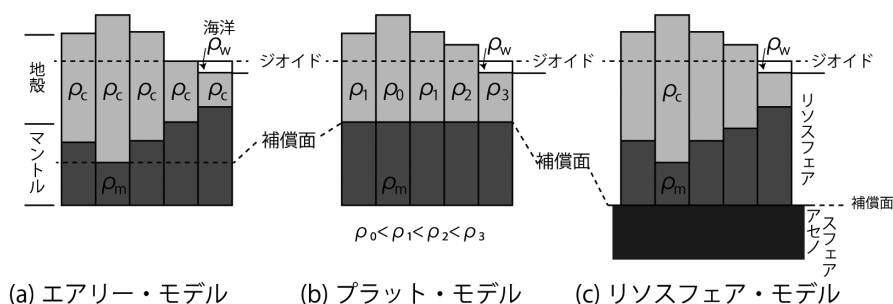


Fig. 1 アイソスタシーのモデル

どちらも地下深部には流動性が高く密度が大きい部分が存在し、その上に硬く密度の小さい地殻が浮いていることを想定している。流動性の高い部分は液体やマグマである必要はなく、固体でも十分に長い時間で考えれば流動をするような粘性体であればよく、この2つのモデルは共に地殻の下のマントルを粘性体として想定している。エアリー・モデルでは地殻を構成している岩石の密度 (ρ_c) はどこでも変わらず、標高が高いところでは、地殻が厚くマントルに根をもつように潜り込んでいる。これによって、流動性のあるマントルのある一定の高さに定めた補償面上に存在する質量はどこでも等しくなる。一方プラット説では、地殻の底部の深さは一定で、高い山ほど密度が軽いと考えることで、同じく補償面上の質量がどこでも同じになると考えた。クロアチアの地震学者モホロビッチ

(1854-1936) が地殻とマンツルの境界に地震波伝搬速度の不連続面（モホ面）を発見したのは1909年のことであり、後の地震波による地下構造の推定からは、地殻の厚さは標高が高いほど深く、エアリー・モデルが現実に近いと考えられた。1960年代以降のプレートテクトニクスの進展により、地球表層の剛体プレートの運動で様々な地質現象の説明が可能となった。エアリー・モデルでは流動性の高いマンツルを想定し、地殻とマンツル境界であるモホ面近くに補償面を想定したが、プレートテクトニクス理論では、流動性の高い部分はリソスフェアの下のアセノスフェアに存在し、補償面はモホ面直下ではなく、リソスフェア―アセノスフェア境界にあると考えられるようになった（Fig. 1 c）。

2.2. 高等学校で学習するアイソスタシー

文部科学省が2009年に改訂し、2012年から実施されている高等学校理科の学習指導要領では、科学と人間生活（2）、物理基礎（2）、物理（4）、化学基礎（2）、化学（4）、生物基礎（2）、生物（4）、地学基礎（2）、地学（4）、理科課題研究（1）、の科目が設置され（括弧内は標準単位数），“「科学と人間生活」を含む2科目又は基礎を付した科目を3科目”が必修科目として指定されている（文部科学省, 2009）。アイソスタシーに関しては、「高等学校・地学（1）地球の概観―イ地球の内部―（イ）地球内部の状態と物質において、アイソスタシーを扱うこと」と定められている。そのため、主要5社が出版している地学基礎の教科書では、アイソスタシーは発展扱いとして簡単な記述があるにとどまっている。また、出版社によってエアリー・モデルとリソスフェア・モデルのどちらかの図を用いて説明している（Table. 1）。

Table. 1 高等学校「地学基礎」教科書によるアイソスタシーの取り扱い

エアリー・モデル （発展扱い）	実教出版、啓林館
リソスフェア・モデル （発展扱い）	数研出版 第一学習社
取り扱いなし	東京書籍

一方で、どの出版社の教科書にもFig. 2のような、大陸と海洋の高度分布図は取り扱いがあり、陸地と海洋の2つのピークは記載されている。

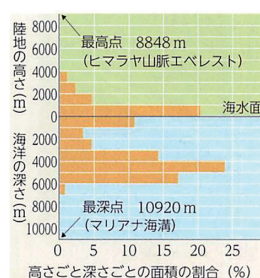


Fig. 2 地球における標高と水深の分布（啓林館「地学基礎」教科書）

他の惑星ではなく、地球にだけこの2つの高度分布のピークが存在する理由はアイソスタシーで説明されるが、地学基礎ではアイソスタシーを学ばないため、単に大陸地殻と海洋地殻が異なる岩石から構成されることに理由があると述べられるに留まっている。

3. アプリケーションの開発

アイソスタシーの特徴は、地形（高度または水深）と地殻の厚さで表される。そこで、地球上の大陸・海洋全てを含む地域において、高度と地殻の厚さ情報を画像として表示させ、更には指定した地点の数値データを取得できるウェブアプリケーションを開発した。

3.1 使用データ

高度（標高および水深）のデータには、アメリカNGDC（米国地球物理データセンター）が公開している陸域および海域全域の地形データETOPO1を利用した（Amante and Eakins, 2009）。ETOPO1は、グリッドデータとして提供されており、そのメッシュサイズは緯度経度で1分 \approx 1.8kmの解像度である。また、地殻の厚さデータには、CRUST1.0を利用した（Laske et al., 2013）。それぞれ、緯度経度1°毎のデータをサーバに保存しておき、任意の指定場所の情報を、画面上で数値データとして表せるようにした。

3.2 使用言語とライブラリ

学習者が自分自身のスマートフォンやタブレット端末で利用ができるよう、開発にはJavaScriptとWebGLを用いた。また、クロスブラウザ対応が可能なWebGLのラッパーとしてthree.jsライブラリ（three.js online: index.html）を用いた。WebGLは、ウェブブラウザで3次元グラフィックスを表示させるための標準規格で、Windows、Macintosh上でのブラウザで動作する。2014年からはiPhoneに標準で搭載されているSafariブラウザでWebGLが動作するように仕様変更されたため、PC/モバイルの違いを考えずに、すべてのプラットフォームでWebGLによる3Dグラフィックスの表示が可能となっている。

3.3 使い方と画面説明

アプリケーションのURLは以下の通りである。

http://www.igeoscience.com/isostasy_globe/

PC、スマートフォン、タブレット端末など、いずれかのブラウザで上記のURLにアクセスすると、仮想地球が画面中心に表示される（Fig. 3）。ドラッグ操作で自由に回転させることができる。画面右上の操作パネルにはスライダーが配置されており、標高・水深情報（ETOPO1）と地殻厚さ情報（CRUST1.0）の不透明度を変化させて表示させることができる。画面中心部には、白色の十字（+）マークが表示されており、この位置の情報（緯度、経度、標高・水深、地殻の厚さ）が操作パネルに常時表示される。画面右上

の情報ボタン (①) を押すと、利用データの引用情報が表示される。Fig. 4 に、代表的な大陸地域を表示させた画面を示す。

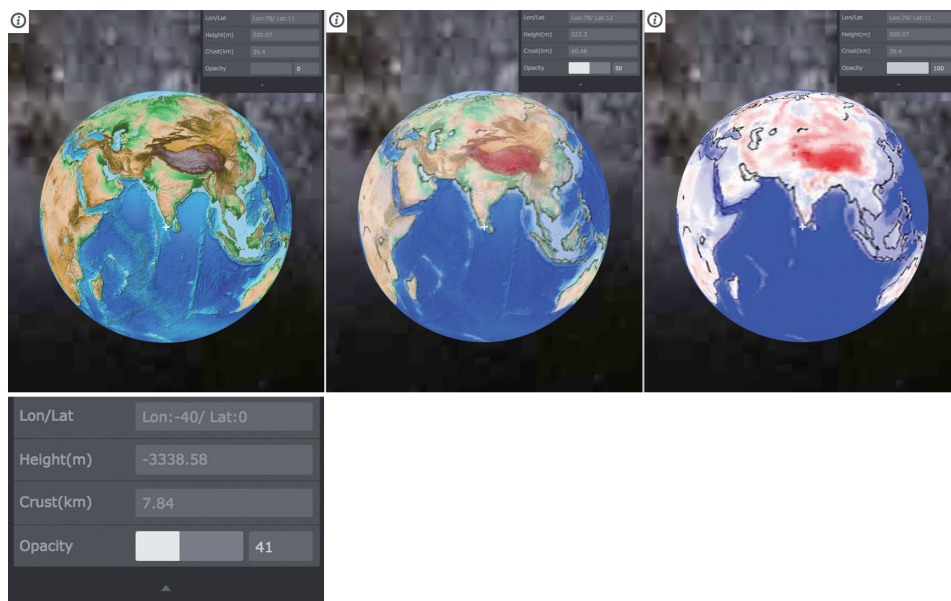


Fig. 3 Isostasy Globe画面イメージ

4. 活用方法 (指導案)

本アプリケーションを利用することで、陸域・海域問わず、世界中全ての場所における高度と地殻の厚さを空間的な広がりをもって把握することができ、また、その地点の数値情報を抽出することができる。以下に、いくつかの例を示しながら、アイソスタシーの学習指導案を提示する。

4.1 標高と地殻の厚さの対応

まず、学習者がアイソスタシーの理論を学んでその概念を理解したら、実際に地球上の高度分布と地殻の厚さの関係がどのようになっているかを、本アプリを使って自分自身で確認する。まずは、標高の高い場所、低い場所、地殻の厚い場所、薄い場所を探す (Table. 2)。この時、地域ごとに標高と地殻の厚さを記録させる。

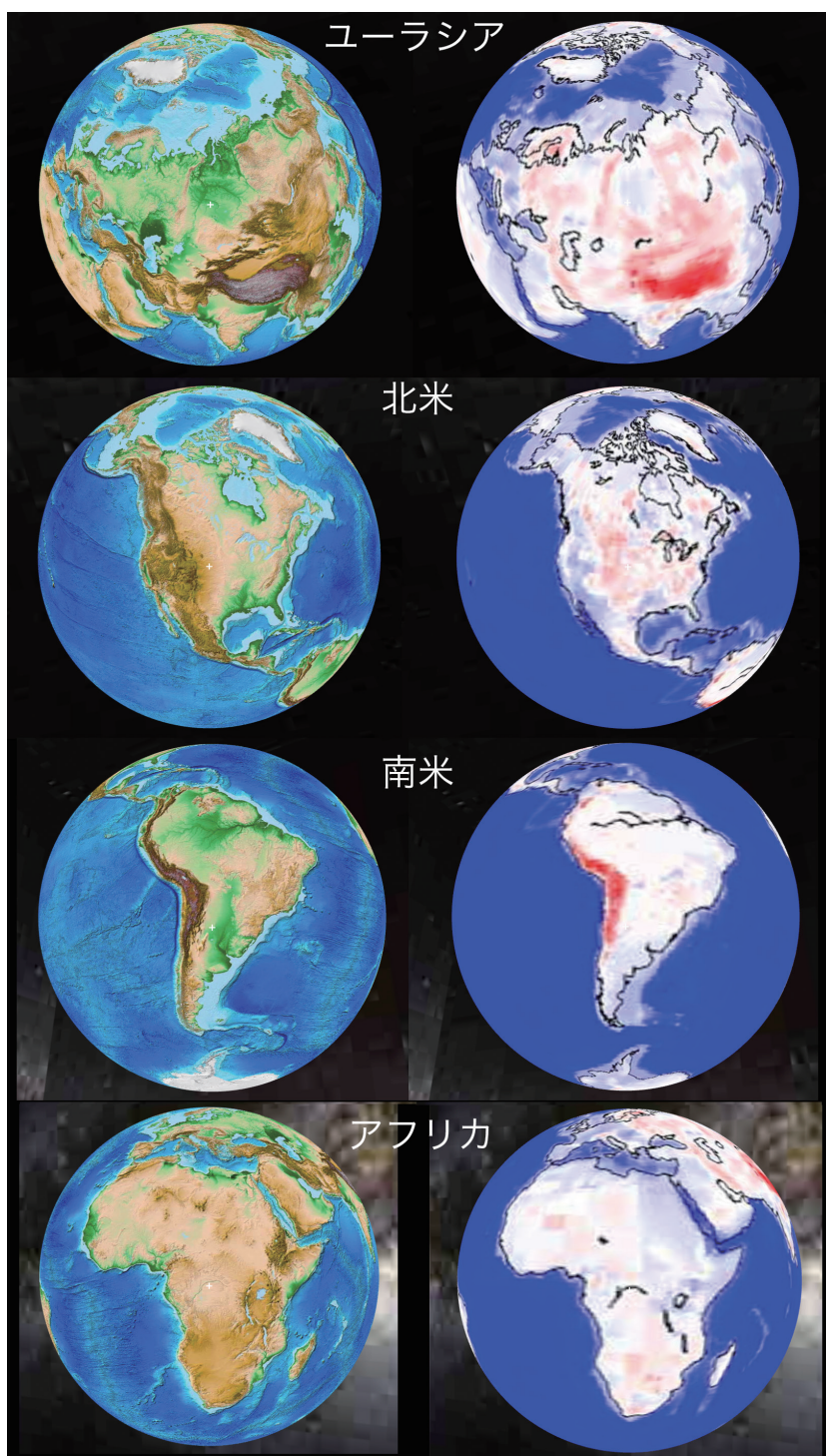


Fig. 4 各大陸の表示例

Table. 2 アプリを用いて学習者が見つける標高と地殻の厚さの地域ごとの違い

標高の高い場所	ヒマラヤ山脈、ロッキー山脈、アンデス山脈、ザグロス山脈、ウラル山脈、アルプス山脈、チベット高原、その他造山帯
標高の低い場所	深海底
地殻の厚い場所	標高の高い場所とほぼ一致
地殻の薄い場所	深海底

ここで学習者に気がついておいてほしいことは以下の点である。

- ・大陸と海洋で、地殻の厚さが異なる。
- ・大陸地域において、標高が高くなると地殻も厚くなる。
- ・深海底地域ではほぼ地殻の厚さが一定（約7 km）である。
- ・大陸棚の地殻の厚さは一般的な海底での地殻の厚さ（7 km）よりも厚い。
- ・大洋における海底の水深は中央海嶺で浅く、そこから離れるに従って深くなる。

4.2 地殻とマンツルの密度比較

エアリー・モデルに従えば、標高が高くなる分だけ地殻は厚くなる。この割合は地殻とマンツルの密度差によるので、アルキメデスの原理を使えば、この比を求めることができる。2地点における標高と地殻の厚さをそれぞれ、 h_1 , h_2 , T_1 , T_2 とする（Fig. 5）。

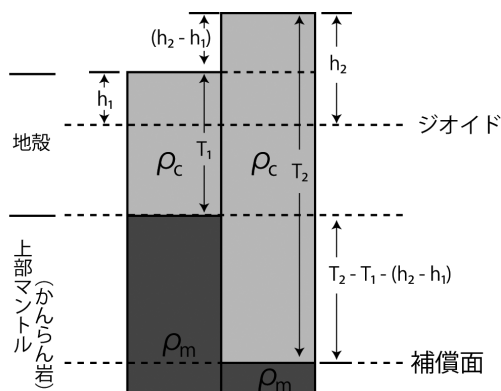


Fig. 5 アイソスタシーのモデル

アイソスタシーが成り立っていれば、補償面より上の重さが等しくなるので、2つの標高の異なる場所での地殻の厚さから以下の式が導かれる。

$$\rho_c T_1 + \rho_m \{T_2 - T_1 - (h_2 - h_1)\} = \rho_c T_2 \quad (1)$$

つまり、

$$\frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (2)$$

となる。ここで、(2)の左辺 $\frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1}$ は、横軸に地殻の厚さ、縦軸に標高をプロットしたグラフの傾きに相当するので、学習者は標高差のあるヒマラヤなどのデータを取得して表にまとめ、グラフにプロットすることでこの傾きを求め、地殻とマントルの比重を計算で求められる。Fig. 6は、その一例である。

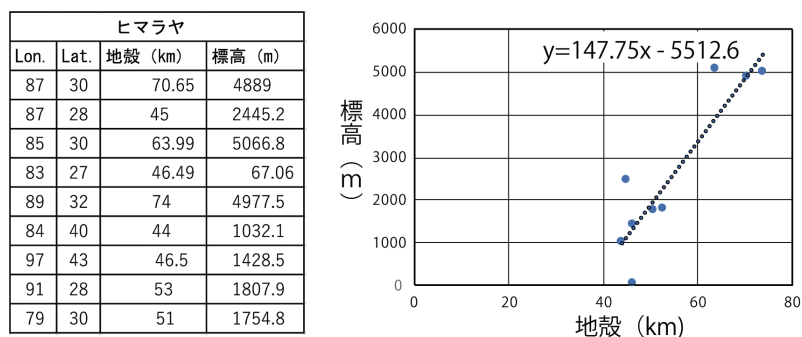


Fig. 6 標高と地殻の厚さ記入表とそのプロット (例)

ここから求められる傾き147.75は、地殻が1 km厚くなると標高が147.75m高くなるということを意味し、仮にマントルの密度 $\rho_m = 3300 \text{ kg/m}^3$ と仮定すると、地殻の密度 $\rho_c = 2812 \text{ kg/m}^3$ となり、大陸地殻の平均密度として妥当な数字となる。

4.3 高度と地殻の厚さの比較

4.2では、高度と地殻の厚さのデータを学習者がアプリ上で取得してグラフをプロットしたが、これらの値を元データを使って散布図にプロットするとFig. 7 のようになる。

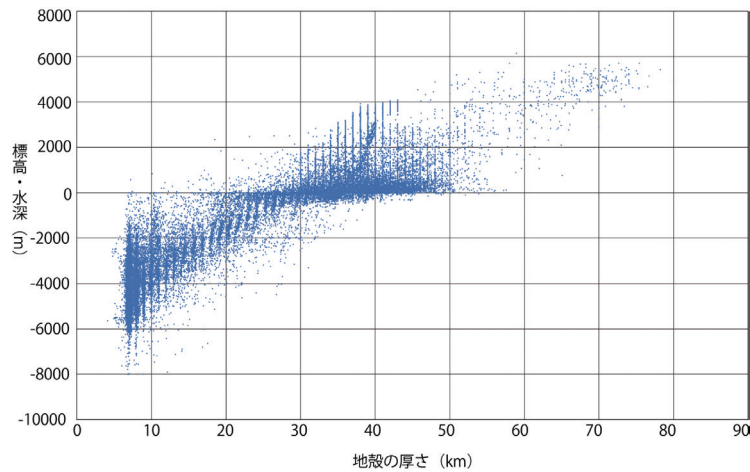


Fig. 7 ETOPO 1 およびCRUST1.0データの散布図 (360°×180°グリッド)

学習者にFig. 7 のグラフを配布し、4.1で調べた地域がこのグラフ上でどこにプロットされているかを書き込ませる。この時、地学基礎の教科書には必ず記載のある高度分布(ハイソメトリック曲線)と比較をするとよい (Fig. 2; Fig. 8)。

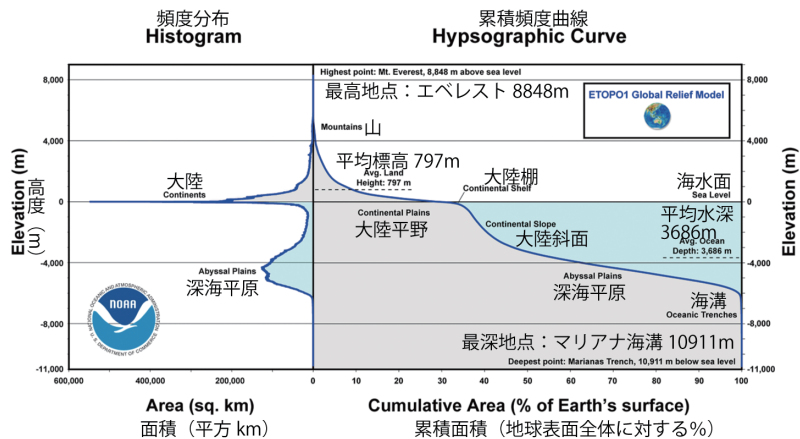


Fig. 8 標高と水深のハイソメトリック曲線 (NOAA Hypsographic curve of Earth's Surface from ETOPO1, Online: etopo 1 _surface_histogram.html)

大陸の平均標高は797m、海底の平均水深は-3686mで、この2つの違いは大陸地殻と海洋地殻の密度差が原因と説明される。頻度分布は0 mと-4000m付近で最大となる。これらの図を見比べると、標高0 m付近では、地殻の厚さが30~50kmに分布し、水深-4000mでは地殻の厚さが7 kmに集中してそれより厚い方向に分散することが見て取れる。これは、大陸地殻の厚さ平均が40km、海洋地殻の厚さ平均が7 kmという知識と合っていることが理解できる。また、標高が高くなると地殻も厚くなる傾向も見て取れる。4.1で学習者が確認した項目が実際にこのグラフで表されているかどうかを確認する。

このように、大陸における標高と地殻の厚さの関係は、アイソスタシーで説明できるように見えるが、Fig. 7においてこれだけでは説明できない幾つかの傾向が見られる。これを学習者に考えさせる。以下のような点に気づかせる。

- ・ 水深0~-4000mまでの海底でも、地殻の厚さが10~30kmある場所
- ・ 地殻の厚さが7 kmと一定の海洋地殻の水深が、-2000~-7000mまで変化がある

指導上の参考のためにFig. 9 とFig.10に、領域毎に区分してプロットした図を示す。

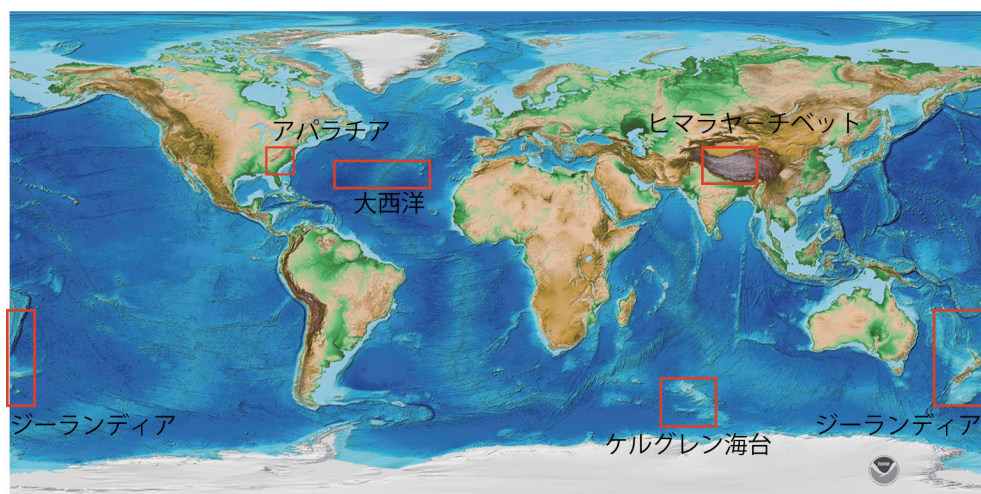


Fig. 9 それぞれの領域を指定して高度と地殻の厚さを比較した場所（ヒマラヤーチベット高原：40N-27N/75E-95E、アパラチア山脈：40N-30N/85W-75W、大西洋：35N-25N/60W-25W、ケルグレン海台：45S-63S/60E-80E、ジーランディア：20S-55S/170W-160E）。Fig.10 に対応している。元図はAmante and Eakins (2009)。

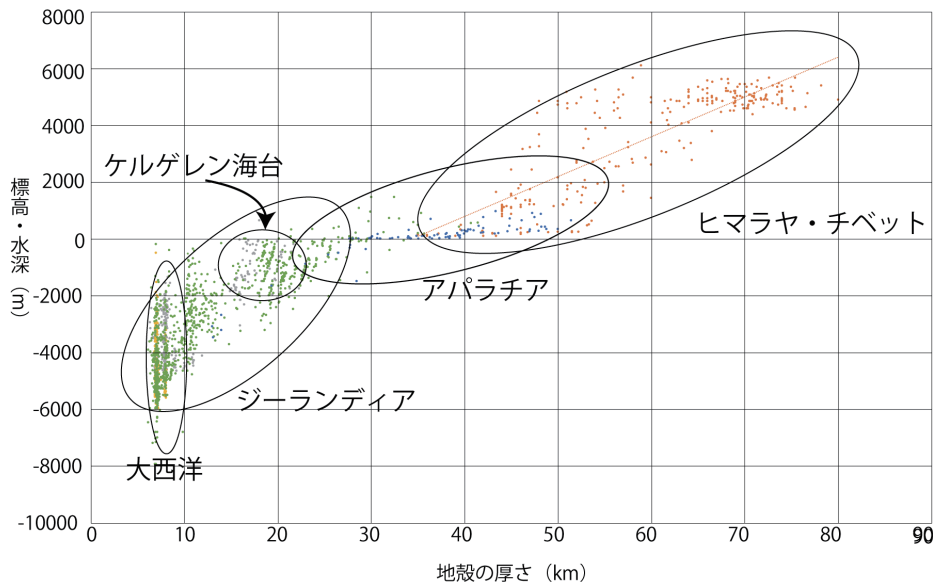


Fig. 10 地域毎の標高・水深と地殻の厚さの関係

ヒマラヤ・チベット地域では、標高と地殻の厚さが比例しており、アイソスタシーで説明ができる。このグラフでのヒマラヤ・チベットの近似曲線の傾きは141.29であり、4.2と同様の計算をすると、地殻の密度 (ρ_c) は2834kg/m³となる。

「水深0～-4000mまでの海底でも、地殻の厚さが10～30kmある場所」としては、ケルゲレン海台、ジーランディアなどがある。もちろん大陸縁辺から海洋につながる漸移帯にもこうした場所はあるが、地質学的な特徴としてこれらには意味がある。

ケルゲレン海台・・・大洋地域には、頂部が比較的平坦で周囲の海底から200m以上隆起している海台が存在している。インド洋のケルゲレン海台もそのうちの1つである。こうした海台の成因には火山活動や断層運動などさまざまあると考えられるが、海台とホットスポットの関係などを考えさせることで、プレートテクトニクスの理解にも繋げることができる。

ジーランディア・・・ジーランディアは、オーストラリアの東方、ニュージーランドを中心とした地域に分布する水没した大陸地殻の断片である (Mortimer et al., 2017)。総面積はおよそ500万m²、その9割以上が海面下にあり、地殻の厚さはおよそ20kmと推測されている。もともとはオーストラリア大陸や南極大陸と一続きの Gondwana 大陸の一部であったが、分裂のちに海底に沈んだと考えられている。

4.4 海洋地殻と海底の深さとの関係（熱的アイソスタシー）

4.3の大西洋のデータを見ても分かる通り、海洋地殻はほぼ厚さ7 kmで一定であるのに、深海底の深さは、-2000m~-7000mで変化に富んでおり、中央海嶺から離れるに従って水深が深くなっている。これは一見するとアイソスタシーの関係が成り立っていないように見える。しかし、これらの関係は中央海嶺で形成される海洋プレート（リソスフェア）の冷却に伴う厚さの変化として解釈することが可能であり、これは熱的アイソスタシーとよばれる。

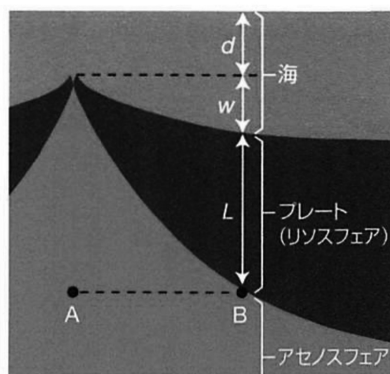


Fig. 11 熱的アイソスタシーによる海底の深さの変化（是永, 2017）

中央海嶺の平均深度は2500mであるのに対して、深海底の平均深度は約4000mである。海洋地殻の厚さがどこでもほぼ7 kmで変化がないのに対して、中央海嶺ではほぼ厚さのないリソスフェアは、中央海嶺から離れるに従って冷却されて厚さが増していく。冷えたリソスフェアは熱いアセノスフェアよりも密度が大きいので、海底の深度は深くなっていく。通常のアイソスタシーは軽い物質が浮いていることを想定しているのに対して、熱的アイソスタシーは軽いアセノスフェアの上に重いリソスフェアがあり、リソスフェアが厚くなれば、水深が深くなるという反対の考え方になる。学習者はFig. 7の海洋底の深さと地殻の厚さの関係から、熱的アイソスタシーへと知識を発展させることができる。

5. まとめ

アイソスタシーは、「山はなぜ高いのか？海はなぜ深いのか？」という単純な問いかけに対して、その回答に欠かせない概念である。様々な学習者が学んだ知識を、地球のあらゆる場所において学習者自らが確認し、アイソスタシーが成り立つ場所、成り立たない場所を考えることで、より深い理解が得られる。今回開発したアプリケーションが、こうした教育の一助となることを望む。

引用文献

- Mortimer et al. (2017) Zealandia: Earth's Hidden Continent. *GSA Today*, 27(3), 27-35.
- 川辺文久 (2017) 地質ニュース, 6, no.1, 25-29.
- 啓林館 (2016) 『地学基礎 改訂版』. 啓林館: 1-239.
- 是永淳 (2017) 『絵でわかるプレートテクトニクス』. 講談社: 1-180.
- 文部科学省 (2009) 高等学校学習指導要領. 東山書房: 1-296.

オンライン文献（全て、2018年10月22日アクセス）

- Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [22 Oct. 2018 accessed].
- NASA Earth Observations (NEO), <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>
- NOAA Hypsographic curve of Earth's Surface from ETOPO1, https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1_surface_histogram.html
- Laske, G., Masters, G., Ma, Z., et al., 2013. A New Global Crustal Model at 1×1 Degrees (CRUST1.0), <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>
- Three.js, <http://threejs.org/index.html>

